

复合管道内液 - 固两相流浆体水击压强计算

周云龙 孙斌 段晓宁 洪文鹏 张玲

(东北电力学院, 吉林 吉林 132012)

摘要 对于单一管道的单相液体水击现象计算已经比较成熟,但是很少有对于复合管道的液固两相流系统的浆体水击计算方面的报道。根据实际工程设计需要,提出了具有复合管道的液-固两相流浆体水击压强的计算方法。同时对某电厂液-固两相流输灰系统浆体水击压强进行了计算与分析,提出了防止浆体水击的措施。

关键词 液-固两相流; 水击; 除灰泵

中图分类号: TB126 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2004)02-0251-04

THE CALCULATION OF SLURRY WATER HAMMER ON LIQUID-SOLID TWO-PHASE FLOW IN COMPLEX PIPELINE SYSTEMS

ZHOU Yun-Long SUN Bin DUAN Xiao-Ning HONG Wen-Peng ZHANG Ling

(Northeast China Institute of Electric Power Engineering, Jilin 132012, China)

Abstract The calculation of water-hammer pressure phenomenon of single-phase liquid is already more mature for a pipeline of uniform characteristics, but the less work has addressed the calculation of slurry water hammer pressure in complex pipelines with slurry flows carrying solid particles. This paper has present calculation methods of slurry water-hammer pressure on liquid-solid two-phase flow system in complex pipelines for actual engineering design. At the same time the calculation and analysis of slurry water-hammer pressure on liquid-solid two-phase flow systems has been done for a steam power plant. Measures to reduce water-hammer pressure in pipelines with slurry flows carrying solid particles are presented.

Key words liquid-solid; two-phase flow; slurry water-hammer; complex tubes

1 前言

在管道设计中要考虑的不稳定流有两类:一类是水击;另一类称为不满流。水击现象在水力输送固体物料(液-固两相流)的管道中又称为浆体水击。在浆体管道中由于有大量固体物料的掺入,无论是压力波的传波速度,还是压强变化,都与单相液体管路中的水击不同。管路中的不满流是指这样一种流态。当管线在地形起伏较大的地方敷设时,在翻过山峰后如地形的落差大于满管流时的阻力,即管流具有剩余位能,则液流就会自动加速,增加阻力,消耗剩余能量。伴随液流的加速,在较长的管线中会出现负压、空穴、气蚀。无论是浆体水击还是不满流的流态,都将威胁管道的安全运行。

对于单一管道的单相液体水击现象计算已经比较成熟^[1,2],但是很少有对于复合管道的液固两相流系统的浆体水击计算方面的报道。本文根据实际工程设计需要,对液-固两相流系统浆体水击压强进行了计算与分析。

2 浆体水击压强计算方法

2.1 单相液体水击压强计算方法

水击中有两个最重要的参数,即水击产生的附加压强 p 以及压力波的传波速度 a 。可根据水流的动量定理和连续性方程推导出^[3]。水击的附加压强:

$$P = \rho \Delta U \frac{\Delta L}{\Delta t} = \rho a \Delta U \quad (1)$$

收稿日期: 2003-12-05; 修订日期: 2004-01-08

作者简介: 周云龙 (1960-), 男, 吉林扶余人, 教授, 博士生导师, 主要从事多相流动特性的研究。

压力波的传波速为:

$$a = \sqrt{\frac{E_w/\rho}{1 + \frac{E_w D}{E_p e}}} \quad (2)$$

上式是针对薄壁管推导的, 对于厚壁管, 则水击波速公式:

$$a = \sqrt{\frac{E_w/\rho}{1 + \frac{E_w(D_2^2 + D_1^2)}{E_p(D_2^2 - D_1^2)}}} \quad (3)$$

式中, D_1, D_2 为厚壁管的内径和外径, mm。

在水击波速推导中, 没有考虑管道在纵向变形和管道的支撑情况有关。如考虑管道在水击附加压强作用下的纵向变形, 则水击压力波速的计算公式为:

$$a = \sqrt{\frac{E_w/\rho}{1 + \frac{E_w D}{E_p e} C_1}} \quad (4)$$

如管道只在上游末端固定, 则 $C_1 = 1 - \mu/2$; 如全管线固定, 则 $C_1 = 1 - \mu^2$; 如全管线都采用膨胀接头, 则 $C_1 = 1$ 。 μ 为泊松比, 等于 0.3。

2.2 液-固两相流系统浆体水击压强计算

浆体中由于存在大量固体颗粒。其密度、弹性模量和粒度组成不同, 因此浆体水击特性还与固体颗粒特性及其在管道中流动特性有密切关系。

均质流颗粒和周围水团的流速一致。在管道末端阀门突然关闭时, 固液两相的流速可以统一考虑, 这与单相流很相似。所不同的是流体的压缩变形, 由于固体、液体的弹性模量不同, 其压缩的体积有固体颗粒的压缩量和水的体积压缩量组成。

假定管道初始流速为 U_{m0} , 关闭阀门后的终了流速为 U_{m1} , 则 $\Delta t = \Delta L/a_{m1}$ 时段内进入 ΔL 管段的浆体体积为:

$$V_m = (U_{m0} - U_{m1})A\Delta t = \Delta U_m A \Delta t \quad (5)$$

式中, A 为管道断面面积, m^2 。

若浆体中固体颗粒的体积浓度为 S_v , 浆体水击引起的附加压强为 p , 则 ΔL 管段内水体积压缩变形量为:

$$V_w = \frac{p}{E_w}(1 - S_v) \cdot A \cdot \Delta L \quad (6)$$

同理 ΔL 管段内, 固体颗粒的体积压缩变形量 V_s 可由固体颗粒弹性模量 E_s 求出:

$$V_s = \frac{p}{E_s} S_v A \cdot \Delta L \quad (7)$$

管道膨胀变形量如上所述, 为:

$$V_p = \frac{pD}{E_p e} A \cdot \Delta L \quad (8)$$

根据连续性原理, 流入的浆体量等于水、固体颗粒的体积压缩量和管道膨胀的体积。

$$V_m = V_w + V_s + V_p \quad (9)$$

将 (5)~(7) 和式 (8) 代入式 (9) 得:

$$\Delta U_m \cdot A \cdot \Delta t = \frac{p}{E_m}(1 - S_v)A \cdot \Delta L +$$

$$\frac{p}{E_s} S_v A \cdot \Delta L + \frac{pD}{E_p e} A \cdot \Delta L \quad (10)$$

由波速的定义可得:

$$a_{m1} = \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad (11)$$

由动量定理 $A \cdot p \cdot \Delta t = \rho_{m1} A \cdot \Delta L \cdot \Delta U_m$ 得:

$$\Delta U_m = \frac{p}{\rho_{m1} a_{m1}} \quad (12)$$

把式 (11)、(12) 代入式 (10), 则得到均质流的波速方程, 假定均质流的波速为 a_{m1} , 则:

$$a_{m1} = \sqrt{\frac{E_w/\rho_m}{1 - S_v + \frac{E_w}{E_s} S_v + \frac{E_w D}{E_p e}}} \quad (13)$$

式中, ρ_m 为均质流的密度, 用式 (14) 计算。

$$\rho_m = \rho_s S_v + (1 - S_v)\rho_L \quad (14)$$

对于具有三层复合管道的弹性模量 E_p 可由下式计算:

$$E_p = \frac{1}{2} \frac{E_1 \ln(D_1/D)}{1 - \mu_1^2} + \frac{1}{2} \frac{E_2 \ln(D_2/D_1)}{1 - \mu_2^2} + \frac{E_3 e_3}{D_2} \quad (15)$$

式中, E_1 为第一层管道的弹性模量, Pa; E_2 为第二层管道的弹性模量, Pa; E_3 为第三层管道的弹性模量, Pa; D 为第一层管道的内径, mm; D_1 为第一层管道的外径 (第二层管道的内径), mm; D_2 为第二层管道的外径 (第三层管道的内径), mm; e_3 为第三层管道的壁厚, mm; μ_1 为第一层管道的泊松比; μ_2 为第二层管道的泊松比。

在管道水力输送中, 由于要考虑到液-固两相流的稳定性, 一般固体颗粒较细, 绝大多数可认为是均质流。均质流由于固体颗粒和水的流速一致,

因此液 - 固两相流浆体水击压强计算关系式, 可以借助单相流的水击压强计算关系式:

$$p = \rho_m a_{m1} (V_0 - V_1) \quad (16)$$

式中, ρ_m 为浆体混合物的密度, kg/m^3 ; a_{m1} 为浆体压力波的波速, m/s ; V_0, V_1 为浆体混合物的初始速度和终止速度, m/s ; p 为浆体的浆击压强, Pa 。

3 工程计算

某电厂除灰系统用水力除灰, 灰渣池的灰浆通过渣浆泵加压后, 送往小山的后面的灰场, 灰渣泵轴线与小山最高点的位差为 190 m, 灰浆管道是由一平段和一爬坡段组成, 水平段的管长 $L_1 = 1000$ m, 爬坡段管长 $L_2 = 2200$ m。如图 1 所示。

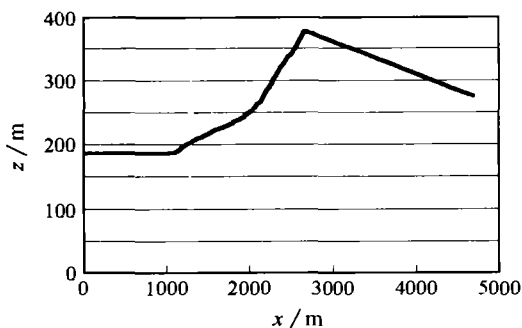


图 1 输灰管路示意图

输灰系统的特点是, 一是输灰管路长; 二是灰渣泵出口与输灰管路最高点的位差大。因此存在一个问题: 一旦运行过程中灰渣泵突然断电停转后, 在 190 m 落差下, 灰浆必将回流, 产生水击现象, 有可能对灰渣泵产生具大的冲击力, 最后导致灰渣泵的损坏, 威胁着电厂的安全和经济生产, 所以非常有必要对液 - 固两相流系统浆体水击现象进行分析和计算。

除灰泵选用国产 250ZJ-A90 型渣浆泵, 其参数: $H = 137$ m, $n = 960$ r/min, 由两台泵串联使用。输灰管道采用铸石复合管, 如图 2 所示。该铸石复合管由三层材料组成, 外壁为钢管, 中间为水泥沙浆充填层, 内层为铸石管。灰浆管的尺寸和有关理化性能如表 1 所示。

根据设计院提供此除灰系统设计流量 $q_v = 1180$ m^3/h , 灰水重量比为 1:10。灰的真实密度为 $\rho_s = 2000$ kg/m^3 。

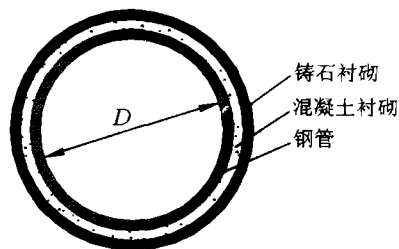


图 2 铸石复合管示意图

表 1 输灰浆的铸石复合管尺寸和有关理化性能 [4]

	内径 D (mm)	壁厚 e (mm)	弹性模量 $E(\text{Pa})$	泊松比 μ
铸石	400	20	167×10^9	0.25
混凝土	440	4	$14 \times 10^9 \sim 30 \times 10^9$	0.1~0.5
钢管	448	6	212×10^9	0.27

为了计算浆击压强, 必须首先计算当输灰泵突然断电后, 灰浆开始倒流时间以及灰浆回落速度。表 2 为灰浆回落速度计算结果。表 3 为按照本文提出的计算方法所得到的典型工况下浆体水击的波速。当突然断电后, 泵停转时灰浆回流产生回流压强为:

$$p_{\text{total}} = p + \rho_m g H \quad (17)$$

表 2 灰浆回落速度计算结果一览表

序 号	管内沿程 阻力系数	管内流速 (m/s)	灰浆开始倒 流时间 (s)	灰浆向上运 动距离 (m)	灰浆回落 速度 (m/s)
1	0.0165	2.61	2.747	3.585	2.166
2	0.0170	2.61	2.734	3.568	2.154
3	0.0175	2.61	2.722	3.551	2.141
4	0.018	2.61	2.709	3.535	2.129
5	0.0183	2.61	2.70	3.525	2.12

表 4 为典型工况下浆击压强计算结果。从表中可以看出, 浆击总压强稍大于泵体能承受的压强 (4.0 MPa)。通过上述计算可以看出, 浆击压强稍大于泵所承受的最大压强, 对渣浆泵或输灰管道需要采取一定的措施, 以保证安全生产。建议采取以下的措施 [3]: 加固渣浆泵体, 提高壳体的承压强度; 加大输灰管路直径; 安装泄流安全阀。在可能发生浆击的管段如泵出口处安装泄流安全阀, 在浆击压强超过某一定后, 阀门自动开启, 泄出部分浆体。由于浆体压缩性很小, 压强随着液体的泄出而迅速降低; 参气降低波速, 缓和浆击压强。由于空气弹性模量很小, 对降低浆击波速, 缓解浆击压强有显著作用; 在管线上安装蓄能式空气罐。这种空气罐是一种密封的圆柱型罐, 其下部用短管与管道连接。罐内上层为压缩空气, 下层为澄清水。由于空气罐不仅可以

表 3 典型工况下浆体水击波速

序号	管道弹性模量 $E_p 10^9$ (Pa)	灰粒弹性模量 $E_s 10^9$ Pa	混凝土弹性模量 $E_{hn} 10^9$ Pa	混凝土泊松比 μ	灰浆混合物密度 ρ (kg/m ³)	浆击波速 a_{m1} (m/s)
1	2.839	14	14	0.1	1047.6	1071.254
2	2.839	14	14	0.5	1047.6	1071.254
3	2.839	14	30	0.1	1047.6	1071.254
4	2.839	14	30	0.5	1047.6	1071.254
5	2.839	30	14	0.1	1047.6	1072.424
6	2.839	30	14	0.5	1047.6	1072.424
7	2.839	30	30	0.1	1047.6	1072.424
8	2.839	30	30	0.5	1047.6	1072.424

表 4 典型工况下浆击压强的计算结果

序号	浆击波速 a_{m1} (m/s)	浆体回落速度 V' (m/s)	浆击压强 P (MPa)	浆击总压强 P_{total} (MPa)
1	1071.254	2.12	2.379	4.29
2	1071.254	2.166	2.43	4.34
3	1072.424	2.12	2.381	4.29
4	1072.424	2.166	2.433	4.34

降低浆击附加压强, 吸收噪音, 防止震动等。因此, 对液固两相流管线, 空气罐是一种行之有效的预防浆击的措施。

4 结 论

本文根据实际工程需要, 提出了具有复合管道

的液 - 固两相流水击压强的计算方法。同时对某一电厂输灰管路, 计算了灰渣泵突然停转时的浆体水击压强。结果表明: 水泵突然停转时, 浆体水击压强会对水泵壳体有一定影响, 因此需对水泵加以防护措施: 建议加固水泵壳体; 加大输灰管路直径; 安装泄流安全阀; 在管路上安装蓄能式空气罐。

参 考 文 献

- [1] 孔珑. 工程流体力学. 北京: 水利电力出版社, 1990
- [2] 周云龙. 工程流体力学. 北京: 中国电力出版社, 1997
- [3] 费祥俊. 浆体与粒状物料输送水力学. 北京: 清华大学出版社, 1994
- [4] 周云龙. 发电厂除灰泵浆体水击压强的计算与分析. 流体机械, 2001, 29(2): 19-21